眼动熵：信息熵在眼动技术中的应用

念靖晴，张禹， 罗禹*

贵州师范大学心理学院，贵阳，550025

摘要：为了量化注视运动可视化模式分析，研究者开始使用眼动熵对任务中的信息搜索模式进行整体性估计。眼动熵作为基于信息熵发展而来的眼动指标，是有效提高个体对注视控制理解度的注视行为测量指标，其核心指标有眼动注视熵和热点图熵，并在精神疾病、驾驶安全、航空安全、教育教学、产品设计、工业安全等领域得到广泛应用和进一步验证。在未来的研究中应该进一步加强眼动熵测量的稳健性和生态效度，以及不断完善眼动熵的测量指标体系。

关键词：眼动 注视熵 静止凝视熵 注意转移熵 热点图熵

*通信作者：罗禹，男，博士，贵州师范大学心理学院教授，E-mail: yuluo@gznu.edu.cn

基金项目：国家自然科学基金(32260209)，贵州省自然科学基金(黔科合基础-ZK[2023]一般 276)

1.引言

眼睛是人类最为关键的信息接收器，个体有 80%~90%的外部信息是通过视觉获取的，人们通过注视来获取并加工视觉信息。“脑-眼假说”认为注视与人们的注意密切相关，而注意又与认知加工过程相联系(Von Helmholtz, 1867)。因此通过眼动追踪，测量眼睛运动过程，可以确定个体在看什么，以及长时程注视特定物体的过程，能够在一定程度上揭示人们的认知加工过程。

数据驱动方法的普及推动了通过眼动对视觉加工行为进行定量测量。通常，眼动追踪分析包括使用基本指标（如：注视次数、时间等）的定量方法，以及使用可视化模式（如：注视图、热点图等）的定性方法。使用基本指标对眼动追踪进行定量分析对于分析个体注视的成分或注视时间是有效的，但不易解读注视运动的整体过程。另一方面，在使用注视运动可视化模式的分析中很难对眼动追踪进行定量分析。为了解决这一问题，研究者将信息熵应用于眼动追踪的数据分析中(Tole et al., 1982)。与注视次数、平均注视时长等传统眼动指标, 眼动熵作为整合性指标, 可对任务中的信息搜索模式进行整体性估计, 从而降低研究结论的情境依赖性, 并降低数据噪声，提升研究结果的稳健性(Shiferaw et al., 2019)。

在信息论中，熵指信息的平均量，信息是指减少不确定情况的知识（Park，1980）。熵的概念起源于物理学，旨在描述系统中的混乱程度(Shannon, 1948)，已经被成功的应用于包括物理学、社会科学等在内的各个领域。虽然熵在 20 世纪 80 年代就被用于眼动研究中的注视分析(Tole et al., 1982)，但直到近些年才越来越受到研究者的关注。Shiferaw 等人（2019）第一次对注视熵中静止注视熵（stationary gaze entropy，SGE）和注视转移熵（gaze transition entropy，GTE）作为视觉搜索效率的测量指标进行了系统性综述。但随着研究的不断深入，一些新的眼动熵指标（如：热力图熵等）被提出，并在新的研究中得到验证和使用(Melnyk et al., 2024)。本文总结了眼动熵的测量指标及计算、应用实例，并在此基础上通过对已有研究结果的分析从而总结相应的结论，并依据已有研究中存在的不足指出未来的研究方向。

2. 眼动熵的测量方法

2.1 眼动熵的测量指标及计算公式

从眼动数据中计算相应的熵值提供了一个定量的单维度指标，便于比较或评估个体的注意分布。目前，最常用的眼动熵计算方法主要有以下两种：一种是利用注视轨迹图（gaze plot）的方法。注视轨迹图主要反映个体在视觉刺激上的注视位置、时间和顺序，并将上述内容生成注视序列，用可视化的方法呈现时即为个体观察该视觉刺激时的轨迹图。此外，利用注视轨迹图的方法计算的眼动注视熵又可以分为静止注视熵和注视转移熵。

另一种是利用热点图（heat map）的方法。眼动热点图，又称眼动热力图或眼动热区图，主要用来反映用户浏览和注视的情况，热点图可展示出被试者在刺激材料上的注意力

分布情况。与注视轨迹图相比，热点图未提供观察顺序的信息和单个注视点的详细信息。但热点图能够高效地同时展示出多个甚至上百名被试者的视觉关注重点区域以及被吸引程度。每种眼动熵的计算方法如下：

2.1.1 基于注视轨迹图的眼动熵指标

注视熵（gaze entropy）以比特（bit）为单位，通过计算眼球运动的空间分布（静止注视熵）和转换模式（注视转移熵）来反映个体在视觉探索过程中表现出的不确定性或可预测性的程度(Krejtz et al., 2015; Shiferaw et al., 2019)。具体如下：

2.1.1.1 静止注视熵

静止注视熵，又称香农熵（Shannon entropy），它衡量的是不同兴趣区之间注视分布的均匀程度，反映了注意力的分布情况，即注视复杂度。其计算公式如下：

$$H(x) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i$$

其中，$H(x)$表示一个试次的眼跳序列x的静态注视熵值，i表示兴趣区编号，n表示序列 x 的长度（注视点的总个数）, p_i表示各兴趣区注视点比例/概率。熵的值与 x 的概率分布有关，而与 x 值本身的大小无关。熵值越高（即不确定性越大），反映出整体注视范围越广，表明视野范围内的注视分散度越大；熵值越低（即不确定性越小），反映出整体注视范围越窄，表示个体的注视集中在特定的兴趣区域上。

然而，静止注视熵没有考虑到眼球运动的相对性，即所有到后续注视的扫视都相对于或源自眼球的当前位置。为了量化后续注视对眼球当前位置的依赖性，研究者使用注意转移熵来测量在不同兴趣区之间的眼动模式。

2.1.1.2 注视转移熵

注视转移熵，又称眼跳注视熵或马尔可夫熵（Markov entropy），基于条件熵（conditional entropy）由注视序列求得得注视转换概率矩阵表示从一种状态变化到另一种状态的变化率(Ciuperca & Girardin, 2005)。被用于衡量兴趣区之间随机眼跳的频繁程度，即：在特定视野内从一个注视位置转换到下一个注视位置的概率的估计值以及从一个感兴趣区域移动到另一个感兴趣区域的概率，反映了注视转换的不确定性，或者说是不可预测性，即注视转换随机性。其计算公式如下：

$$H(x) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \sum_{j=1}^{n} p^{((i|j))}\, log_2\left[p^{(i|j)}\right]$$

其中，$H(x)$表示一个试次的眼跳序列 x 的注视转移熵值， p_i表示第 i 个状态的概率，$p^{(i|j)}$表示表示从兴趣区i到j的眼跳概率。注视转移熵值越大表示发生注视转移的随机性越强，眼跳越频繁，注意力越少集中在某一个或几个兴趣区上。

转移熵值在 0 至 1 的范围内。$H(x)$ 值越接近 0，扫视模式的可预测性（注视在 AOI 之间切换）越高。$H(x) = 0$ 表示扫视模式完全可预测。$H(x)$值越接近 1，扫视模式越随机

2.1.1.3 注视时间熵

由于静止注视熵和注视转移熵是依据注视落到兴趣区内的次数来计算熵值的，因此它

们无法反映注视在兴趣区内的注视时间。例如：注视在特定兴趣上注视时间为 100 ms 与注视时间为 500 ms 被视为相同的注视时间。为了更好的反映注视在兴趣上的注视时间，研究者提出并使用香农熵公式来计算注视时间熵（Dwell time entropy/fixation-time entropy）。

$$H = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i$$

其中，p_i 被定义为第 i 个兴趣区的注视时间与所有兴趣区总注视时间的比例。注视时间熵值越大，表明个体对该兴趣区的注视时间越长；反之，则相反。

2.2 基于热点图的眼动熵指标

热点图熵（heatmap entropy）也称视觉注意熵（visual attention entropy，VAE），反映了被试眼球运动在空间中的一致性或集聚性，它不考虑注视点的时间顺序，只关注兴趣区中的注视次数和持续时间(Gu et al., 2021)。热点图熵的计算基于高斯混合模型（Gaussian Mixture Model，GMM），假设注视点遵循以特定像素（x_f，y_f）为中心的高斯分布，且该分布位于一个矩形平面上（例如：分辨率为 1920×1080 像素的电脑屏幕，能够形成 1920 个 X 坐标和 1080 个 Y 坐标的组合），这使得注视点可以被视为二维随机变量（X, Y），则其联合概率分布可通过下列公式表示(Y. Liu et al., 2010)：

$$f_{xy}(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} exp - \left(\frac{\left(x - x_f\right)^2 + \left(y - y_f\right)^2}{2\sigma^2}\right)$$

其中，σ是标准差，即眼动追踪中的视角（visual angle）大小，是用户观看屏幕时能够识别的像素范围。如果在屏幕上形成了多个注视分布，则需要对注视分布分配权重(Ahn et al., 2016; Gu et al., 2021; Son et al., 2020)，并将其表示为一个连续的概率分布，如下所示：

$$f_{xy}(x,y) = \sum_{f=1}^{f_{num}} d_f \times \frac{1}{2\pi\sigma^2} exp - \left(\frac{\left(x - x_f\right)^2 + \left(y - y_f\right)^2}{2\sigma^2}\right)$$

其中 f_{num} 是注视总次数（number of fixation），d_f 是每个注视点分布（fixation distribution）的权重，满足$\sum_{f=1}^{f_{num}} d_f = 1$。

基于香农熵公式并整合联合概率分布函数和权重连续概率分布函数，热图熵的计算公式如下：

$$H = -\sum_{xy} f_{xy}(x,y) \log f_{xy}(x,y)$$

热点图熵值越大，表示注视均匀分散在屏幕上；热点图熵值越小，表示所有注视都集中在屏幕的特定范围上。

2.2.3 小结

眼动熵的四个测量指标具有互补的特点，其中静止注视熵是根据注视点数与兴趣区内注视总数的比例计算得出的，不考虑眼动的移动模式和注视持续时间。另一方面，注视时间熵是根据注视在兴趣区中持续间的比例计算得出的，而注视转移熵则是通过考虑兴趣区内的注视时间和兴趣区间的视线移动来计算的。此外，为了能够在不同的任务之间进行比

较，可以使用相应熵的最大值$H_{max} = log_2 n$将计算出的静止注视熵和注视转移熵标准化为0 到 1 之间的范围。最后，热点图熵是一种无需指定兴趣区即可得出视线移动熵的方法。

2.3 眼动熵的计算工具

目前用于熵计算的工作包主要有 EntropyHub(Flood & Grimm, 2021)和 GridWare(Hollenstein, 2007, 2013; Lewis et al., 1999)。详细介绍如下：

2.3.1 EntropyHub

EntropyHub 是由 Flood & Grimm（2021）开发的用于执行熵时间序列分析的开源工具包，其将许多已建立的熵方法整合为一个完整的资源，提供使高级熵时间序列分析变得简单且可复现的工具，支持 MATLAB、Python 和 Julia。EntropyHub 提供了超过四十个函数，能够估算交叉熵、多尺度熵、多尺度交叉熵和二维熵，每个函数都包含多个关键字参数，允许用户在熵计算中自定义多个参数。其安装说明、函数语法描述以及使用示例都在支持文档中详细列出，文档可以在 EntropyHub 网站†上获取。

2.3.2 GridWare

GridWare 是由 Alex Lamey 基于 Lewis 及其同事的研究成果(Lewis et al., 1999)设计的一款专为多变量时间序列的顺序数据（有序或类别数据）可视化和数据处理的多功能工具(Hollenstein, 2007)。该工具包支持 Windows 和 Mac OS X 系统，安装和使用说明等在使用手册中均详细列出，使用手册可以在 State Space Grids 网站‡上获取。其中，GridWare 1.15（测试版）新增了熵值和转移倾向的计算功能。

3. 眼动熵的应用实例

3.1 精神疾病

精神疾病的生物标志物是用于诊断、治疗和评估预后的特定生物特征。其中，非侵入性生物标志物因其具有无创、安全等特点在精神疾病中极具潜力而备受研究者关注。眼动指标（如：注视、眼跳等）作为非侵入性生物标志物的重要指标之一，已经成为研究精神疾病生物标志物的一个重要方向。研究表明，眼动熵在作为精神疾病的神经生理标记物方面也极具潜力(Azami et al., 2022, 2022; Z. Liu et al., 2024; Q. Wang et al., 2020; Yang et al., 2024; D. Zhang et al., 2024)。如：Zhang 等（2024）发现与健康控制组相比，首发精神分裂症和精神病临床高危综合征的眼动熵分数更高，且这种差异在眼动扫描的早期阶段就会出现。同时，在观看无意义图片时，精神病临床高危综合征的眼动熵分数也显著高于健康控制组。此外，研究还发现眼动熵分数与临床症状和神经认知表现相关。结果表明，首发精神分裂症和精神病临床高危综合征眼动扫描模式的随机性更高且策略性更低。此外，Wang 等（2020）研究发现，孤独症儿童在观看面孔时的眼动熵比正常儿童更高。结果表明，孤独

† EntropyHub 主页链接：https://www.EntropyHub.xyz

‡ State Space Grids 主页链接：https://www.queensu.ca/adolescent-dynamics-lab/state-space-grids

症儿童缺乏有效的面孔扫描策略，从而不能有效的提取面孔信息。上述研究表明，眼动熵眼动熵作为精神疾病的潜在生物标志物，可以为疾病病理机制的理解、早期诊断和疗效评估提供新的视角。

3.2 驾驶安全

良好的视觉功能是驾驶的先决条件，因为驾驶环境包含海量、复杂且不断变化的视觉信息，驾驶员需通过结构化的注视分配，系统地采样这些信息以指导他们的行动(Land & Lee, 1994; Owsley & McGwin Jr, 2010)。研究发现，注视熵可以作为预测驾驶员在行驶过程中视觉扫描效率的有效指标(Aitken et al., 2023, 2024; Diaz-Piedra et al., 2021; Hayley et al., 2024; Jeong et al., 2019; Mikula et al., 2020)。如：在从事次要视觉任务时，与年轻驾驶员相比，老年驾驶员注意转移熵的值更低(Schieber & Gilland, 2008)。此外，在经历完全睡眠剥夺一晚的驾驶员，随着驾驶时长的增加，注视转移熵的值会增加，同时静止注视熵的值会降低(B. A. Shiferaw et al., 2018)，在关于使用酒精(B. Shiferaw, Crewther, et al., 2019; B. A. Shiferaw et al., 2019)、甲基苯丙胺(Hayley et al., 2024)的驾驶员注视熵也发生了类似的改变。研究者还发现，当血液中的酒精含量增加或减少时，注视熵的值会发生统计上显著的变化(B. Shiferaw, Crewther, et al., 2019)。此外，注视熵还可以作为驾驶经验的有效预测指标(Chung et al., 2022)。Chung 等（2022）的研究发现，与新手驾驶员经过十字路口相比，经验丰富驾驶员的静止注视熵和注视转移熵的值更高，结果表明经验丰富的驾驶员比新手处理了更多的信息，并且由于注视密度低而记录了较高的静止注视熵；同时，新手驾驶员组的注视转换主要集中在近距离兴趣区（如：交通信号灯、行人和经过的车辆）间的视觉搜索，而经验丰富的驾驶员组的注视转换则主要关注于检查周围交通状况（如：左右后视镜和与交通相关的兴趣区）以辅助驾驶。由于经验丰富的驾驶员主要搜索车辆周围的目标，因此在每次会车时，驾驶员的注视区域都会发生变化，从而导致了注视转换熵值的增加。

3.3 航空安全

研究表明，眼动指标已经成为研究飞行员认知负荷变化的有效指标(Diaz-Piedra et al., 2016; Heard et al., 2018; Mengtao et al., 2023)，其中瞳孔扩张和眨眼频率是操作员任务负荷研究中最常用的两个指标(Heard et al., 2018)。但在真实的航空环境中，上述两个指标易受亮度和湿度变化等环境变化的影响，而注视熵对环境变化的敏感性较低，因此其可以作为真实航空环境中测量认知负荷的敏感且稳健的关键指标(Ayala et al., 2023; Causse et al., 2025; Devlin et al., 2022)。然而，将飞行员注视熵作为任务负荷指标的研究发现了不一致的结果。具体来说：一些研究则发现飞行员注视熵的值随着任务负荷的增加而降低(Diaz-Piedra et al., 2019)。如：当飞行员在不同任务负荷下飞行时，注视熵率随着飞行任务复杂性的增加而降低(Harris et al., 1982; Tole et al., 1982)。Diaz-Piedra 等（2019）研究也发现，与常规飞行（低复杂度）相比，战斗直升机飞行员在解决飞行中紧急情况时，注视熵的值显著降低。而另一些研究发现飞行员注视熵的值随着任务负荷的增加而增加。如：Di Nocera 等（2007）的

研究发现，当飞行员在执行高负荷飞行程序（模拟起飞和着陆）时，注视熵值较高，表明眼动注视分散度较高；而在低负荷阶段低负荷阶段（爬升、下降和巡航阶段）时，注视熵值较低，表明眼动注视分散度较低。此外，在进行应急处置程序时，飞行员发现驾驶舱仪表故障后，注视熵的值会升高(Van De Merwe et al., 2012; Van Dijk et al., 2011)。此外，在疲劳驾驶(Naeeri et al., 2021)、紧急情况诱发焦虑情绪(Allsop & Gray, 2014)、通航环境差(C. Zhang et al., 2024)时，飞行员注视熵的变化也得到了类似的结果。

此外，对于空中管制人员的研究也有类似发现(Lanini-Maggi et al., 2021; Y. Wang et al., 2021)。例如：Lanini-Maggi 等（2021）研究发现较高的静止注视熵（即视觉注视在显示屏上的空间分布较大）与空中管制人员更好的反应准确性相关，而专业水平则有助于提高反应准确性。同时，在控制动画类型和专业水平后，静止注视熵仍然能够正向预测反应时间。

研究者推测对飞行员研究结果不一致可能是飞行经验、专业技能等导致的，经验更丰富的飞行员可以更好地管理他们的注视模式，在应对高负荷的工作时变化更小(Ayala, Kearns, et al., 2024; Ayala, Mardanbegi, et al., 2024; Friedrich et al., 2021; Gao & Wang, 2024)，但这一推论仍需更多的研究来进一步验证。

3.4 教育教学

研究者将眼动熵作为教育教学中评估教学任务难度、教学效果、教学互动等方面的关键指标。具体来说：在医学教学应用中，注视熵已成功用于识别专家放射科医生在医学影像评估过程中的兴趣水平的变化，从而追踪他们的学习曲线(Alzubaidi et al., 2010)。此外，Di Stasi 等人（2016）通过探究外科住院医在虚拟仿真系统中进行腹腔镜模拟手术练习时，任务复杂度对注视熵的影响。结果发现，静止注视熵的值随着任务复杂度的增加而线性增加，表明在更复杂的练习中，个体的注视模式更加随机(Di Stasi et al., 2016)，在关于机器人手术技能训练(Wu et al., 2020)、泌尿外科手术技能评估和培训(Diaz-Piedra et al., 2017)等研究中也得到了类似的结果。在课堂教学中，注视熵被用于评价课堂教学中教师的教学能力水平。研究发现教师扫视路径模式的复杂性越高（注视熵值越高），对学生及其潜在与学习相关特征的判断就越准确(Kosel et al., 2021)。此外，在技能学习方面，注视熵被用于预测攀岩路线选择和规划的表现(Hacques et al., 2022; van Knobelsdorff et al., 2020)。研究发现，攀岩学习方案会让攀岩者在攀岩过程中产生不同时序的注视模式，以适应攀岩路线的变化。

3.5 产品设计

研究者将眼动熵作为视觉传达设计中测试和改进视觉元素布局合理性的重要指标(Doellken et al., 2021; Gu et al., 2021; Hooge & Camps, 2013; Lee et al., 2023; Quach et al., 2022; M. Zhang et al., 2022)。如：Lee 等（2023）使用热点图熵作为评估可视化界面适用性的有效指标，研究发现热图熵与借助可视化界面判定系统状态的表现密切相关，随着系统状态判定时间的增加，热点图熵的值也会增加。同时，与正确判定系统状态相比，未正确判定系统状态的热点图熵的值更高。此外，Doellken 等（2021）使用注视熵预测工程师和学生根

据设计指南完成工程设计任务的表现。结果发现，表现优秀的工程师静止注视熵显著较低，而表现好的学生则往往具有较高的静止注视熵和注视转移熵。

3.6 工业安全

研究表明，人为失误是造成工业生产事故的重要诱因，如：态势感知（situation awareness）等。态势感知是个体正确应对处置突发情景时的重要能力之一，眼动熵作为评估态势感知能力的指标，已经在化工生产、核电站设备运行、特种设备操控等领域得到有效验证(Bhavsar et al., 2017; Das & Maiti, 2024; Iqbal et al., 2024; Lee et al., 2022)。如： Lee 等（2022）研究发现，在核电站突发情景处置过程中，训练组和非训练组之间的注视熵值和态势感知均无显著差异。但核电站操作员的注视熵值与态势感知显著负相关。

3.7 其他

除上述应用领域外，眼动熵在问题解决(Ayala et al., 2022)、跨期决策(刘洪志 等, 2023)、意向归因(Zajenkowska et al., 2024)、压力测量(Ahmadi et al., 2022)等认知和心理状态以及体育赛事(Albaladejo-García et al., 2024; van Biemen et al., 2023)等领域也得到进一步的应用和验证。

4 总结与展望

信息论在衡量、理解和预测人类行为中的关键作用日益突显，眼动熵作为基于信息熵发展而来的眼动指标，是有效提高个体对注视控制理解度的注视行为测量指标，其在精神疾病、驾驶安全、航空安全、教育教学、产品设计、工业安全等领域得到广泛应用和进一步验证。但关于眼动熵的现有研究也存在一些局限性，未来可在以下几个方面进一步探索。

4.1 眼动熵测量的稳健性和生态效度有待加强

由于眼动熵分析缺乏标准化方案，导致计算公式应用在眼动数据的方式和以及描述这些数据时使用的术语不一致。这些不一致可能会影响眼动熵的稳健性和生态效度(B. Shiferaw, Downey, et al., 2019)。首先，兴趣区确定方法的异质性影响了眼动熵测量的稳健性。具体来说，兴趣区数量的确定会影响眼动熵的计算，其决定了眼动熵能在多大程度熵反映注视控制的随机性和可预测性。已有研究中主要使用网格均分法、内容驱动兴趣区法以及注视点驱动的数据聚类法等来确定兴趣区数量，虽然这些方法都是为了生成眼动熵计算所需的兴趣区分布，但这些方法之间的差异性和适用性可能会导致同一情境下计算眼动熵的结果会有所不同，从而影响研究结果的稳健性。其次，眼动熵结果报告方式的差异可能会影响其生态效度。已有的研究在报告眼动熵时以观察熵为主，较少的报告标准化熵。与观察熵相比，标准化熵在跨刺激和任务间进行比较时的准确性、可解释性以及适用性更高。因此，建议在未来的研究除报告观察熵外，还应加强对标准化熵的报告。

4.2 眼动熵的测量指标体系仍需完善

扫视路径理论认为，个体在注视图像或特定场景时，会存储场景特征和用于检查该场景的注视序列。该理论还假设，个体识别熟悉场景时会遵循与初次观看时相似的扫描路径

(Noton & Stark, 1971a, 1971b)。已有研究进行扫描模式分析时（如：注视转移熵）主要基于一阶马尔科夫链，其核心假设是只有前一个注视点的位置才能预测才能预测下一个注视点的时间，即扫描路径的可预测性只存在较短距离的时间相关性。然而，这种假设存在一定的局限性，即路径扫描模式也可能表现出更长距离的时间相关性(Wiebel-Herboth et al., 2021; Wollstadt et al., 2021)。为了回答这一问题，Wiebel-Herboth 等（2021）使用主动信息存储(Active information storage，AIS)法发现以个性化的方式考虑扫描路径中较长的时间范围有利于解释动态任务中的注视模式。但这种方法是否更优于其它方法仍需在未来的研究进一步探索。此外，已有研究主要基于信息论中的香农熵构建眼动技术中的指标体系，但是否可以基于其它熵的算法继续完善眼动熵的测量指标仍有待进一步研究。

参考文献

Ahmadi, N., Sasangohar, F., Yang, J., Yu, D., Danesh, V., Klahn, S., & Masud, F. (2022). Quantifying workload and stress in intensive care unit nurses: preliminary evaluation using continuous eye-tracking. *Human Factors*. Advance online publication.

Ahn, S., Kim, J., Kim, H., & Lee, S. (2016). Visual attention analysis on stereoscopic images for subjective discomfort evaluation. In *2016 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)* (pp. 1–6). 2016 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME).

Aitken, B., Downey, L. A., Rose, S., Arkell, T. R., Shiferaw, B., & Hayley, A. C. (2024). Driving performance and ocular activity following acute administration of 10 mg methylphenidate: a randomised, double-blind, placebo-controlled study. *Journal of Psychopharmacology*. Advance online publication.

Aitken, B., Hayley, A. C., Ford, T. C., Geier, L., Shiferaw, B. A., & Downey, L. A. (2023). Driving impairment and altered ocular activity under the effects of alprazolam and alcohol: a randomized, double-blind, placebo-controlled study. *Drug and Alcohol Dependence*, *251*, 110919.

Albaladejo-García, C., Campo, V. L., Morenas, J., & Moreno, F. J. (2024). *Gaze behaviors, estimated quiet eye characteristics, and decision making of nonexpert assistant referees judging offside events in soccer*.

Allsop, J., & Gray, R. (2014). Flying under pressure: effects of anxiety on attention and gaze behavior in aviation. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, *3*(2), 63–71.

Alzubaidi, M., Patel, A., Panchanathan, S., & Jr, J. A. B. (2010). Reading a radiologist's mind: monitoring rising and falling interest levels while scanning chest x-rays. In *Medical Imaging 2010: Image Perception, Observer Performance, and Technology Assessment* (Vol. 7627, pp. 128–137). SPIE.

Ayala, N., Kearns, S., Irving, E., Cao, S., & Niechwiej-Szwedo, E. (2024). The effects of a dual task on gaze behavior examined during a simulated flight in low-time pilots. *Frontiers in Psychology*, *15*.

Ayala, N., Mardanbegi, D., Zafar, A., Niechwiej-Szwedo, E., Cao, S., Kearns, S., … Duchowski, A. T. (2024). Does fiducial marker visibility impact task performance and information processing in novice and low-time pilots? *Computers & Graphics*, *119*, 103889.

Ayala, N., Zafar, A., Kearns, S., Irving, E., Cao, S., & Niechwiej-Szwedo, E. (2023). The effects of task difficulty on gaze behaviour during landing with visual flight rules in low-time pilots. *Journal of Eye Movement Research*, *16*(1), Article 1. https://doi.org/10.16910/jemr.16.1.3

Ayala, N., Zafar, A., & Niechwiej-Szwedo, E. (2022). Gaze behaviour: a window into distinct cognitive processes revealed by the tower of London test. *Vision Research*, *199*, 108072.

Azami, H., Chang, Z., Arnold, S. E., Sapiro, G., & Gupta, A. S. (2022). Detection of oculomotor dysmetria from mobile phone video of the horizontal saccades task using signal processing and machine learning approaches. *IEEE Access*, *10*, 34022–34031. IEEE Access.

Bhavsar, P., Srinivasan, B., & Srinivasan, R. (2017). Quantifying situation awareness of control room operators using eye-gaze behavior. *Computers & Chemical Engineering*, *106*, 191–201.

Causse, M., Mercier, M., Lefrançois, O., & Matton, N. (2025). Impact of automation level on airline pilots' flying performance and visual scanning strategies: a full flight simulator study. *Applied Ergonomics*, *125*, 104456.

Chung, J., Lee, H., Moon, H., & Lee, E. (2022). The static and dynamic analyses of drivers' gaze movement using VR driving simulator. *Applied Sciences*, *12*(5), 2362.

Ciuperca, G., & Girardin, V. (2005). On the estimation of the entropy rate of finite markov chains. In *Proceedings of the international symposium on applied stochastic models and data analysis* (pp. 1109–1117).

Das, S., & Maiti, J. (2024). Assessment of cognitive workload based on information theory enabled eye metrics. *Safety Science*, *176*, 106567.

Devlin, S. P., Brown, N. L., Drollinger, S., Sibley, C., Alami, J., & Riggs, S. L. (2022). Scan-based eye tracking measures are predictive of workload transition performance. *Applied Ergonomics*, *105*, 103829.

Di Stasi, L. L., Diaz-Piedra, C., Rieiro, H., Sánchez Carrión, J. M., Martin Berrido, M., Olivares, G., & Catena, A.

(2016). Gaze entropy reflects surgical task load. *Surgical Endoscopy*, *30*(11), 5034–5043.
Diaz-Piedra, C., Rieiro, H., Cherino, A., Fuentes, L. J., Catena, A., & Di Stasi, L. L. (2019). The effects of flight complexity on gaze entropy: an experimental study with fighter pilots. *Applied Ergonomics*, *77*, 92–99.
Diaz-Piedra, C., Rieiro, H., & Di Stasi, L. L. (2021). Monitoring army drivers' workload during off-road missions: an experimental controlled field study. *Safety Science*, *134*, 105092.
Diaz-Piedra, C., Rieiro, H., Suárez, J., Rios-Tejada, F., Catena, A., & Di Stasi, L. L. (2016). Fatigue in the military: Towards a fatigue detection test based on the saccadic velocity. *Physiological Measurement*, *37*(9), N62.
Diaz-Piedra, C., Sanchez-Carrion, J. M., Rieiro, H., & Di Stasi, L. L. (2017). Gaze-based Technology as a Tool for Surgical Skills Assessment and Training in Urology. *Urology*, *107*, 26–30.
Doellken, M., Zapata, J., Thomas, N., & Matthiesen, S. (2021). Implementing innovative gaze analytic methods in design for manufacturing: A study on eye movements in exploiting design guidelines. *Procedia CIRP*, *100*, 415–420.
Flood, M. W., & Grimm, B. (2021). EntropyHub: an open-source toolkit for entropic time series analysis. *PLOS One*, *16*(11), e0259448.
Friedrich, M., Lee, S. Y., Bates, P., Martin, W., & Faulhaber, A. K. (2021). The influence of training level on manual flight in connection to performance, scan pattern, and task load. *Cognition, Technology & Work*, *23*(4), 715–730.
Gao, S., & Wang, L. (2024). How flight experience impacts pilots' decision-making and visual scanning pattern in low-visibility approaches: preliminary evidence from eye tracking. *Ergonomics*, *67*(10), 1284–1300.
Gu, Z., Jin, C., Chang, D., & Zhang, L. (2021). Predicting webpage aesthetics with heatmap entropy. *Behaviour & Information Technology*, *40*(7), 676–690.
Hacques, G., Dicks, M., Komar, J., & Seifert, L. (2022). Visual control during climbing: Variability in practice fosters a proactive gaze pattern. *PLOS ONE*, *17*(6), e0269794.
Hayley, A. C., Shiferaw, B., Aitken, B., Rositano, J., & Downey, L. A. (2024). Acute methamphetamine and alcohol usage alters gaze behaviour during driving: a randomised, double-blind, placebo-controlled study. *Journal of Psychopharmacology*. Advance online publication.
Heard, J., Harriott, C. E., & Adams, J. A. (2018). A survey of workload assessment algorithms. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, *48*(5), 434–451. IEEE Transactions on Human-Machine Systems.
Hollenstein, T. (2007). State space grids: analyzing dynamics across development. *International Journal of Behavioral Development*, *31*(4), 384–396.
Hollenstein, T. (2013). *State space grids: Depicting dynamics across development*. Springer US.
Hooge, I. T. C., & Camps, G. (2013). Scan path entropy and arrow plots: capturing scanning behavior of multiple observers. *Frontiers in Psychology*, *4*.
Iqbal, M. U., Srinivasan, B., & Srinivasan, R. (2024). Multi-class classification of control room operators' cognitive workload using the fusion of eye-tracking and electroencephalography. *Computers & Chemical Engineering*, *181*, 108526.
Jeong, H., Kang, Z., & Liu, Y. (2019). Driver glance behaviors and scanning patterns: applying static and dynamic glance measures to the analysis of curve driving with secondary tasks. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, *29*(6), 437–446.
Kosel, C., Holzberger, D., & Seidel, T. (2021). Identifying expert and novice visual scanpath patterns and their relationship to assessing learning-relevant student characteristics. *Frontiers in Education*, *5*.
Krejtz, K., Duchowski, A., Szmidt, T., Krejtz, I., Perilli, F., Pires, A., … Villalobos, N. (2015). Gaze transition entropy. *ACM Transactions on Applied Perception*, *13*, 1–20.
Land, M. F., & Lee, D. N. (1994). Where we look when we steer. *Nature*, *369*(6483), 742–744.
Lanini-Maggi, S., Ruginski, I. T., Shipley, T. F., Hurter, C., Duchowski, A. T., Briesemeister, B. B., … Fabrikant, S. I. (2021). Assessing how visual search entropy and engagement predict performance in a multiple-objects tracking air traffic control task. *Computers in Human Behavior Reports*, *4*, 100127.
Lee, Y., Jung, K., & Lee, H. (2023). Human performance and heat map entropy in system state judgment task using a visual interface screen. *Engineered Science*, *23*(0), 854.
Lee, Y., Jung, K.-T., & Lee, H.-C. (2022). Use of gaze entropy to evaluate situation awareness in emergency accident situations of nuclear power plant. *Nuclear Engineering and Technology*, *54*(4), 1261–1270.
Lewis, M. D., Lamey, A. V., & Douglas, L. (1999). A new dynamic systems method for the analysis of early socioemotional development. *Developmental Science*, *2*(4), 457–475.
Liu, Y., Cormack, L. K., & Bovik, A. C. (2010). Dichotomy between luminance and disparity features at binocular fixations. *Journal of Vision*, *10*(12), 23–23.
Liu, Z., Li, J., Zhang, Y., Wu, D., Huo, Y., Yang, J., … Chen, J. (2024). Auxiliary diagnosis of children with attention-deficit/hyperactivity disorder using eye-tracking and digital biomarkers: Case-control study. *JMIR mHealth and uHealth*, *12*(1), e58927.
Melnyk, K., Friedman, L., & Komogortsev, O. V. (2024). What can entropy metrics tell us about the characteristics of ocular fixation trajectories? *PLOS One*, *19*(1), e0291823.
Mengtao, L., Fan, L., Gangyan, X., & Su, H. (2023). Leveraging eye-tracking technologies to promote aviation safety- a review of key aspects, challenges, and future perspectives. *Safety Science*, *168*, 106295.
Mikula, L., Mejía-Romero, S., Chaumillon, R., Patoine, A., Lugo, E., Bernardin, D., & Faubert, J. (2020). Eye-head coordination and dynamic visual scanning as indicators of visuo-cognitive demands in driving simulator. *PLOS One*, *15*(12), e0240201.
Naeeri, S., Kang, Z., Mandal, S., & Kim, K. (2021). Multimodal analysis of eye movements and fatigue in a simulated glass cockpit environment. *Aerospace*, *8*(10), 283.

Noton, D., & Stark, L. (1971a). Scanpaths in saccadic eye movements while viewing and recognizing patterns. *Vision Research*, *11*(9), 929-IN8.
Noton, D., & Stark, L. (1971b). Scanpaths in eye movements during pattern perception. *Science*, *171*(3968), 308–311.
Owsley, C., & McGwin Jr, G. (2010). Vision and driving. *Vision Research*, *50*(23), 2348–2361.
Quach, S., Septianto, F., & Thaichon, P. (2022). The divergent effects of neat food presentation on purchase likelihood: The moderating role of time-related positioning. *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, *35*(6), 1425–1442.
Schieber, F., & Gilland, J. (2008). Visual entropy metric reveals differences in drivers' eye gaze complexity across variations in age and subsidiary task load. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *52*(23), 1883–1887.
Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, *27*(3), 379–423.
Shiferaw, B. A., Crewther, D. P., & Downey, L. A. (2019). Gaze entropy measures detect alcohol-induced driver impairment. *Drug and Alcohol Dependence*, *204*, 107519.
Shiferaw, B. A., Downey, L. A., Westlake, J., Stevens, B., Rajaratnam, S. M. W., Berlowitz, D. J., … Howard, M. E. (2018). Stationary gaze entropy predicts lane departure events in sleep-deprived drivers. *Scientific Reports*, *8*(1), 2220.
Shiferaw, B., Crewther, D., & Downey, L. A. (2019). Gaze entropy measures reveal alcohol-induced visual scanning impairment during ascending and descending phases of intoxication. *Journal of Studies on Alcohol and Drugs*, *80*(2), 236–244.
Shiferaw, B., Downey, L., & Crewther, D. (2019). A review of gaze entropy as a measure of visual scanning efficiency. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *96*, 353–366.
Son, S.-B., Lee, Y., & Lee, H.-C. (2020). *Program for heat-map entropy evaluation of eye-tracking data*.
Tole, J. R., Stephens, A. T., Vivaudou, M., Harris, R. L., & Ephrath, A. R. (1982, January 1). *Entropy, instrument scan and pilot workload*. IEEE conf. on Systems, Man and Cybernetics, Seattle.
van Biemen, T., Oudejans, R. R. D., Savelsbergh, G. J. P., Zwenk, F., & Mann, D. L. (2023). Into the eyes of the referee: a comparison of elite and sub-elite football referees' on-field visual search behaviour when making foul judgements. *International Journal of Sports Science & Coaching*, *18*(1), 78–90.
Van De Merwe, K., Van Dijk, H., & Zon, R. (2012). Eye movements as an indicator of situation awareness in a flight simulator experiment. *The International Journal of Aviation Psychology*, *22*(1), 78–95.
Van Dijk, H., Van De Merwe, K., & Zon, R. (2011). A coherent impression of the pilots' situation awareness: Studying relevant human factors tools. *The International Journal of Aviation Psychology*, *21*(4), 343–356.
van Knobelsdorff, M. H., van Bergen, N. G., van der Kamp, J., Seifert, L., & Orth, D. (2020). Action capability constrains visuo-motor complexity during planning and performance in on-sight climbing. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *30*(12), 2485–2497.
Von Helmholtz, H. (1867). *Handbuch der physiologischen optik* (Vol. 9). Voss.
Wang, Q., Hoi, S. P., Wang, Y., Song, C., Li, T., Lam, C. M., … Yi, L. (2020). Out of mind, out of sight? Investigating abnormal face scanning in autism spectrum disorder using gaze-contingent paradigm. *Developmental Science*, *23*(1), e12856.
Wang, Y., Wang, L., Lin, S., Cong, W., Xue, J., & Ochieng, W. (2021). Effect of working experience on air traffic controller eye movement. *Engineering*, *7*(4), 488–494.
Wiebel-Herboth, C. B., Krüger, M., & Wollstadt, P. (2021). Measuring inter- and intra-individual differences in visual scan patterns in a driving simulator experiment using active information storage. *PLOS One*, *16*(3), e0248166.
Wollstadt, P., Hasenjäger, M., & Wiebel-Herboth, C. B. (2021). Quantifying the predictability of visual scanpaths using active information storage. *Entropy*, *23*(2), 167.
Wu, C., Cha, J., Sulek, J., Zhou, T., Sundaram, C. P., Wachs, J., & Yu, D. (2020). Eye-tracking metrics predict perceived workload in robotic surgical skills training. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *62*(8), 1365–1386.
Yang, H., He, L., Li, W., Zheng, Q., Li, Y., Zheng, X., & Zhang, J. (2024). An automatic detection method for schizophrenia based on abnormal eye movements in reading tasks. *Expert Systems with Applications*, *238*, 121850.
Zajenkowska, A., Bodecka-Zych, M., Duda, E., Gagnon, J., & Krejtz, K. (2024). "the way I see it makes me believe you intentionally did it": intentionality ascription and gaze transition entropy in violent offenders. *Biological Psychology*, *193*, 108962.
Zhang, C., He, J., Liu, C., Zhu, W., Luo, S., & Jiang, C. (2024). Effect of daytime and nighttime on helicopter pilot's gaze behavior: a preliminary study in real flight conditions. *Aviation*, *28*(4), 235–246.
Zhang, D., Ma, C., Xu, L., Liu, X., Cui, H., Wei, Y., … Wang, J. (2024). Abnormal scanning patterns based on eye movement entropy in early psychosis. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, S2451902224001617.
Zhang, M., Hou, G., & Chen, Y.-C. (2022). Effects of interface layout design on mobile learning efficiency: a comparison of interface layouts for mobile learning platform. *Library Hi Tech*, *41*(5), 1420–1435.
[刘洪志, 杨钘兰, 李秋月, 魏子晗. (2023). 跨期决策中的维度差异偏好：眼动证据. *心理学报*, *55*(4), 612–625.]

Eye movement entropy: Application of information entropy in eye-tracker

NIAN Jingqing, ZHANG Yu, LUO Yu

(School of Psychology, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: To quantify the gaze movement visualization patterns, researchers have begun using eye movement entropy for a holistic estimation of information search patterns during tasks. Eye movement entropy, an eye movement metric derived from information entropy, is an effective measure for improving understanding of individuals' gaze control behavior. Its core metrics include gaze fixation entropy and heatmap entropy, which have been widely applied and further validated in fields such as mental health, driving safety, aviation safety, education, product design, and industrial safety. Future research should focus on enhancing the robustness and ecological validity of eye movement entropy measurements, as well as continuously improving the measurement system of eye movement entropy.

Keywords: eye movement, gaze entropy, stationary gaze entropy, gaze transition entropy, heatmap entropy